



CRICTE 2017

XXVIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia



ANÁLISE DE CONDUTORES SENDO PERCORRIDOS POR CORRENTE ALTERNADA

Natalia Braum Chagas

Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA, Alegrete - RS

E-mail: nataliachagas@unipampa.edu.br

Diego Brum Chaves

Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA, Alegrete - RS

E-mail: diegobchaves29@gmail.com

Eduarda Lazzeri Kottwitz

Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA, Alegrete – RS

E-mail: dudakott@gmail.com

Débora Patrícia Fensterseifer Bottura

Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA, Alegrete – RS

E-mail: deborabottura1@gmail.com

Resumo. Neste artigo abordamos a efetividade de métodos, como o da divisão clássica, para o contorno do efeito pelicular e proximidade em condutores cilíndricos. Para a obtenção de dados, utilizamos análises numéricas através do uso de softwares de simulação, como o Maxwell, com o objetivo de verificar a efetividade dos métodos atuais, e como esses podem ser melhorados. Os dados coletados pelo software também foram utilizados para propor um novo método.

Palavras-chave: Análise Numérica. Efeito Pelicular. Efeito Proximidade.

1. INTRODUÇÃO

Quando uma corrente alternada flui por um condutor, a densidade de corrente elétrica na superfície do condutor é maior que no centro do mesmo, ou seja, a densidade de corrente não é constante por todo o condutor. Este efeito é conhecido como efeito pelicular ou efeito *skin*. Outro efeito importante abordado por esse artigo é

o efeito proximidade, o qual decorre da aproximação de dois ou mais condutores.

Através de tabelas de conversão de fios e do método clássico de divisão de condutores [1], foram realizadas simulações através de do *software Maxwell*, para fim de análise de perdas e resistências, e para constatar quais as variáveis impactam mais nessas análises.

2. EFEITO PELICULAR E EFEITO PROXIMIDADE

O efeito pelicular é a tendência da corrente alternada (CA) fluir em um condutor de modo que a densidade de corrente torna-se maior na superfície do condutor [2]. Assim, a distribuição de corrente não é homogênea. Esse efeito é vinculado a condições de frequência e propriedades do meio de condução [3].

A profundidade de penetração pelicular “*d*” determina o ponto onde a corrente é apenas 37% [4] daquela na superfície do condutor, dada pela Eq. (1).

$$d = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu}} \quad (1)$$

Onde “ f ” é a frequência da corrente, “ μ ” a permeabilidade magnética do material e “ ρ ” é a resistividade do material.

Quando dois ou mais condutores são colocados próximos, há a ocorrência do efeito proximidade, o qual atua devido a interferência do campo eletromagnético produzido pelos condutores vizinhos. Se a corrente dos condutores fluir na mesma direção, a densidade de corrente dos condutores tende a se afastar das densidades dos demais condutores vizinhos.

3. ANÁLISE DE RESULTADOS OBTIDOS POR SIMULAÇÕES

O método clássico para amenizar as perdas adicionais provenientes do efeito pelicular consiste em dividir a área do condutor original, pela área obtida usando o raio da Eq. (1). O valor resultante dessa divisão deve ser o número de condutores em paralelo usados para dividir o condutor original [1]. O raio dos novos condutores é encontrado dividindo o raio do condutor original pela raiz do número de condutores em paralelo, conforme a Eq. (2).

$$r = \frac{r_0}{\sqrt{N}} \quad (2)$$

Foram realizadas simulações de conjunto de condutores no *software Maxwell*. Neste tópico serão apresentados os resultados para um projeto que tinha um condutor AWG 22 como original e uma corrente de 0,448A à 250kHz. A Tabela 1 contém os resultados das simulações realizadas nesse condutor, de uma até oito divisões. As perdas para o condutor AWG 22 foram consideradas 100% enquanto que as perdas das demais divisões foram comparadas percentualmente ao caso de apenas 1 condutor.

A figura 1 mostra como esses oito grupos de condutores foram montados nas simulações. A disposição desses é de extrema importância, como será melhor evidenciado em um tópico posterior.

| f (kHz) | Divisões | Raio Cond. (mm) | Resistencia (Ω/m) | Perdas (W/m) | Percentuais |
|---------|----------|-----------------|-------------------|--------------|-------------|
| 250 | 1 | 0,3215 | 0,07808 | 0,00783 | 100% |
| | 2 | 0,2273 | 0,07186 | 0,00721 | 92,04% |
| | 3 | 0,1856 | 0,07456 | 0,00748 | 95,49% |
| | 4 | 0,1608 | 0,07342 | 0,00737 | 94,16% |
| | 5 | 0,1438 | 0,07157 | 0,00718 | 91,66% |
| | 6 | 0,1313 | 0,07027 | 0,00705 | 90,00% |
| | 7 | 0,1215 | 0,07002 | 0,00702 | 89,69% |
| | 8 | 0,1137 | 0,06763 | 0,00678 | 86,63% |

Levando em consideração que todos os condutores considerados são de cobre, a profundidade de penetração pelicular calculada pela Eq. (1) pode ser observada na Eq. (3)

Tabela 1. Simulações sobre condutor de AWG 22

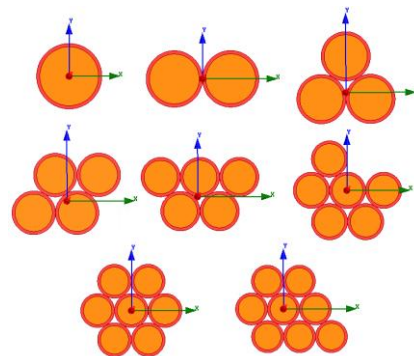


Figura 1. Arranjo de condutores

$$d = \sqrt{\frac{1,72 \cdot 10^{-8}}{\pi^2 * 4 \cdot 10^{-7} * 250 \cdot 10^{-3}}} = 0,1320mm \quad (3)$$

Como o condutor AWG 22 tem raio de $r = 0,3219$ mm, o número de condutores que devem ser usados em paralelo no lugar do condutor original se dá pela Eq. (4).

$$N = \frac{\pi * (0,3219 \cdot 10^{-3})^2}{\pi * (0,1320 \cdot 10^{-3})^2} = 5,9369 \quad (4)$$

Com esse resultado, concluímos que segundo o método clássico, devemos usar

seis condutores em paralelo. Se observarmos a Tabela 1, o conjunto de condutores que apresentou menor resistência elétrica foi o de oito condutores.

Utilizando o *software Maxwell*, simulamos o condutor AWG 22, nas frequências de 50kHz a 250kHz, com um passo de 50kHz. Foram realizadas até 25 divisões sobre esse condutor. A Fig. 2 contem o gráfico de resistência x divisões. Note que, quanto maior for o número de divisões, menor é a resistência do conjunto.

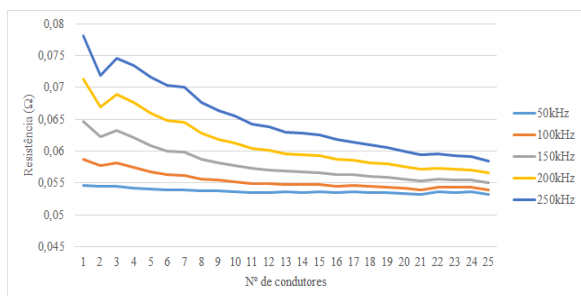


Figura 2. Gráfico Resistência x Nº de condutores

Note que, o caso com dois condutores apresenta um valor diferente da tendência geral da curva da Fig. 2. Se um determinado dispositivo fornecer margem para perdas um pouco maiores, o uso de apenas dois condutores é recomendado, já que fisicamente este arranjo é mais fácil que um conjunto maior de condutores em paralelo.

4. CONDUTORES COMERCIAIS

No tópico anterior, foram realizadas análises da resistência dos condutores, tendo como original o condutor AWG 22. Quando dividimos os condutores, os raios de cada um dos condutores usados em paralelo é dado pela Eq. (2). Porém, para aplicações reais, não dispomos de todos os condutores resultantes da Eq. (2). O resultado deve ser arredondado, procurando o valor de condutores mais próximos na tabela AWG. Essa necessidade faz com que o comportamento da curva resistência versus divisões assumam padrões não desejáveis, como pode ser visto na Fig. 3.

Observe que existe certa descontinuidade nas curvas. Isso ocorre porque, ao aumentarmos as divisões, o raio dos condutores não muda em alguns casos, já que a melhor aproximação do raio continua sendo a do conjunto anterior.

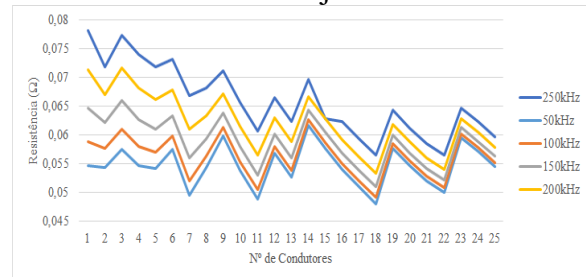


Figura 3. Gráfico Resistência x Nº de condutores.

5. DEPENDÊNCIA GEOMÉTRICA E MODELO ESPECIAL

Ao longo de várias simulações e análises, um fato ficou bastante evidente: dentre as várias variáveis que determinam a resistência total de um conjunto de condutores, a disposição desses é um dos fatores mais determinantes. A Fig. 4 mostra a distribuição da corrente em um conjunto de condutores. Os condutores mais centrais possuem uma densidade de corrente melhor distribuída.

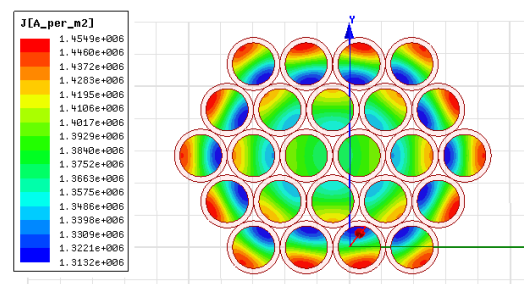


Figura 4. Arranjo de 25 condutores

Como o efeito proximidade decorre da interação do campo entre os condutores, podemos anular essas interações em alguns casos, manipulando a disposição dos condutores. A Fig. 5 mostra a densidade de corrente em 5 condutores. Observe que o condutor do meio tem uma corrente praticamente homogênea.

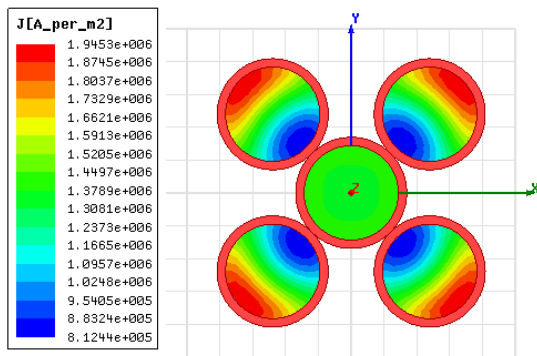


Figura 5. Arranjo com 5 condutores

Mesmo que o arranjo evidenciado na imagem acima possua um condutores com corrente homogenea, os outros condutores apresentam diferentes densidades de corrente ao longo de sua área. Um arranjo foi desenvolvido visando manter as correntes de todos os cinco condutores mais próximos de algo homogêneo. Esse modelo será tratado como “Modelo Especial”, e pode ser visto na Fig. 6.

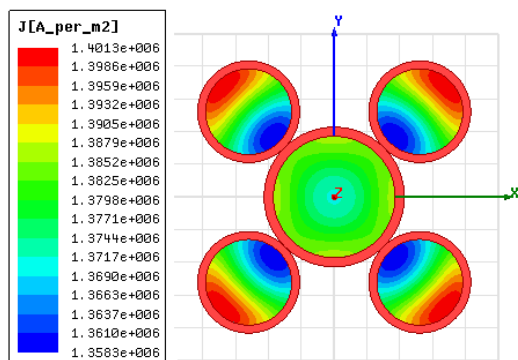


Figura 6. Modelo Especial

Nesse modelo, visamos manter a corrente do condutor central duas vezes maior que nos condutores laterais. Para isso, se todos condutores forem feitos do mesmo material, o raio do condutor central deve ser raiz de duas vezes maior que os condutores laterais. As Equações (5), (6) resultam no: raio e corrente do condutor central.

$$r = \frac{r_0}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

$$I = \frac{I_0}{3} \quad (6)$$

Onde “ r_0 ” é o valor do raio original do condutor AWG, e “ I_0 ” é a corrente do dispositivo.

Se usarmos o condutor AWG 22 como condutor original, a uma frequência de 250kHz, o modelo especial apresenta resistência de: $0,0537 \Omega$. Em comparação a divisão de vinte e cinco condutores, na frequências de 250kHz, da Fig. (2), esse conjunto tem 8,20% de resistência elétrica a menos.

Um dos grandes problemas em implementar fisicamente o Modelo Especial, vem do fato que os condutores laterais devem estar distanciados em exatos 90° uns dos outros. Para ter um valor preciso, para esse arranjo, seria necessário a manufatura desse conjunto.

6. REFERÊNCIAS

- [1] I. BARBI, *Eletrônica de Potência*. EDUFSC, 2000.
- [2] R. ROBERT, *Efeito Pelicular*. Revista brasileira de ensino de física, 2000.
- [3] W. H. HAYT, *Eletromagnetismo*. Livros Técnicos e científicos, 1983
- [4] K. SHORES, *Model Railroad Wire Ampacity Derivation*, 2017. [Oline]. Available: <http://www.sumidacrossing.org>

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como foi evidenciado, os métodos clássicos empregados para diminuir as perdas adicionais do efeito pelicular falham em vários aspectos. A dificuldade para determinar quais padrões devem ser usados são muito mais complexos.

Existe diversos fatores que determinam a resistência total de um conjunto, tenso desses a disposição geométrica do conjunto, variável de difícil determinação. Com exceção do Modelo Especial, não foi do escopo desse trabalho determinar uma metodologia para minimizar as perdas por efeito pelicular. Trabalhos futuros, que terão uma abordagem numérica, serão realizados para determinar uma metodologia.